

Paradigme de Programare

Conf. dr. ing. Andrei Olaru

andrei.olaru@upb.ro | cs@andreiolaru.ro
Departamentul de Calculatoare

2024

Cursul 3: Calcul Lambda

λ

$$(\lambda x. x \ y) \rightarrow_{\beta} y$$

- 1 Introducere
- 2 Lambda-expresii
- 3 Reducere
- 4 Evaluare
- 5 Limbajul lambda-0 și incursiune în TDA
- 6 Racket vs. lambda-0

Introducere

- ne punem problema dacă putem realiza un calcul sau nu → pentru a demonstra trebuie să avem un model simplu al calculului (**cum realizăm calculul**, în mod formal).
- un model de calculabilitate trebuie să fie cât mai simplu, atât ca număr de **operații** disponibile cât și ca mod de **construcție a valorilor**.
- corectitudinea unui program se demonstrează mai ușor dacă limbajul de programare este mai apropiat de mașina teoretică (modelul abstract de calculabilitate).

- **Model de calculabilitate** (Alonzo Church, 1932) – introdus în cadrul cercetărilor asupra fundamentelor matematicii.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Lambda_calculus]

- sistem formal pentru exprimarea calculului.
- **Echivalent** cu Mașina Turing (v. Teza Church-Turing)
- Axat pe conceptul matematic de **funcție** – totul este o funcție

- Aplicații importante în
 - **programare**
 - demonstrarea formală a **corectitudinii** programelor, datorită modelului simplu de execuție

- Baza teoretică a numeroase **limbaje**:
LISP, Scheme, Haskell, ML, F#, Clean, Clojure, Scala, Erlang etc.

Lambda-expresii

1 $x \rightarrow$ variabila (numele) x



Exemplu



Exemplu

- 1 $x \rightarrow$ variabila (numele) x
- 2 $\lambda x.x \rightarrow$ funcția identitate



- 1 $x \rightarrow$ variabila (numele) x
- 2 $\lambda x.x \rightarrow$ funcția identitate
- 3 $\lambda x.\lambda y.x \rightarrow$ funcție selector



- 1 $x \rightarrow$ variabila (numele) x
- 2 $\lambda x.x \rightarrow$ funcția identitate
- 3 $\lambda x.\lambda y.x \rightarrow$ funcție selector
- 4 $(\lambda x.x y) \rightarrow$ aplicația funcției identitate asupra parametrului actual y



- 1 $x \rightarrow$ variabila (numele) x
- 2 $\lambda x.x \rightarrow$ funcția identitate
- 3 $\lambda x.\lambda y.x \rightarrow$ funcție selector
- 4 $(\lambda x.x y) \rightarrow$ aplicația funcției identitate asupra parametrului actual y
- 5 $(\lambda x.(x x) \lambda x.x) \rightarrow ?$



Exemplu

- 1 $x \rightarrow$ variabila (numele) x
- 2 $\lambda x.x \rightarrow$ funcția identitate
- 3 $\lambda x.\lambda y.x \rightarrow$ funcție selector
- 4 $(\lambda x.x y) \rightarrow$ aplicația funcției identitate asupra parametrului actual y
- 5 $(\lambda x.(x x) \lambda x.x) \rightarrow ?$



Intuitiv, evaluarea aplicației $(\lambda x.x y)$ presupune substituția textuală a lui x , în corp, prin $y \rightarrow$ rezultat y .

+ λ -expresie

- **Variabilă**: o variabilă x este o λ -expresie;
- **Funcție**: dacă x este o variabilă și E este o λ -expresie, atunci $\lambda x.E$ este o λ -expresie, reprezentând funcția **anonimă**, unară, cu parametrul formal x și corpul E ;
- **Aplicație**: dacă F și A sunt λ -expresii, atunci $(F A)$ este o λ -expresie, reprezentând aplicația expresiei F asupra parametrului actual A .



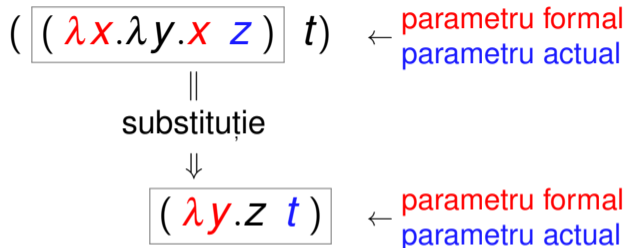
$((\lambda x.\lambda y.x z) t)$

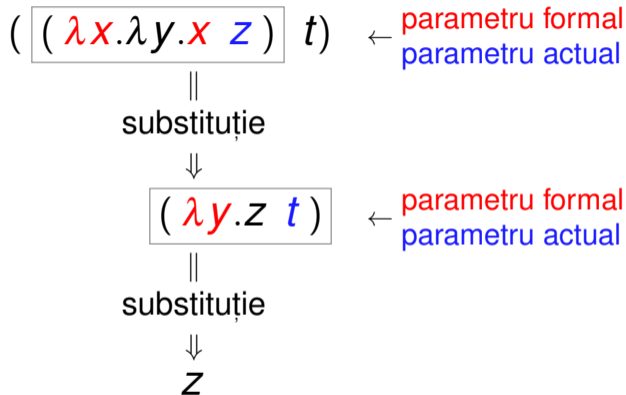


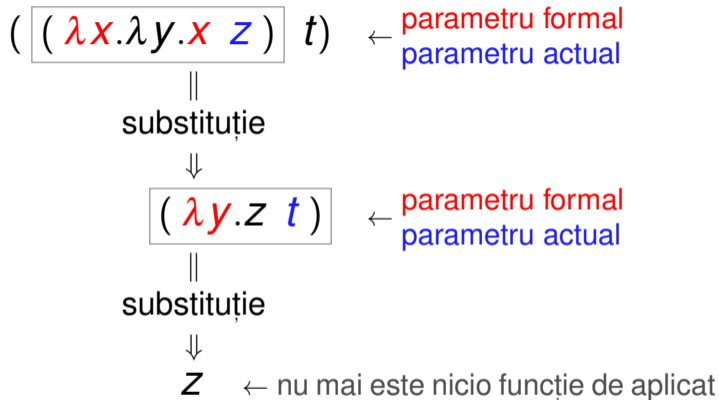
$((\lambda x. \lambda y. x z) t)$ ← parametru formal
parametru actual



$$\begin{array}{c}
 \left(\left(\lambda x. \lambda y. x z \right) t \right) \leftarrow \begin{array}{l} \text{parametru formal} \\ \text{parametru actual} \end{array} \\
 \parallel \\
 \text{substituție} \\
 \Downarrow \\
 (\lambda y. z t)
 \end{array}$$









$((\lambda x. \lambda y. x z) t)$ ← parametru formal
parametru actual

||
substituție

$(\lambda y. z t)$ ← parametru formal
parametru actual

||
substituție

z ← nu mai este nicio funcție de aplicat

· cum știm **ce** reducem, **cum** reducem, în ce **ordine**, și ce **aparitii** ale variabilelor înlocuim?

Reducere

- β -redex: o λ -expresie de forma: $(\lambda x.E A)$
 - E – λ -expresie – este corpul funcției
 - A – λ -expresie – este parametrul actual

- β -redexul se reduce la $E_{[A/x]}$ – E cu toate aparițiile **libere** ale lui x din E înlocuite cu A prin substituție textuală.

+ **Apariție legată** O apariție x_n a unei variabile x este legată într-o expresie E dacă:

- $E = \lambda x.F$ sau
- $E = \dots \lambda x_n.F \dots$ sau
- $E = \dots \lambda x.F \dots$ și x_n apare în F .

+ **Apariție liberă** O apariție a unei variabile este liberă într-o expresie dacă nu este legată în acea expresie.

- **Atenție!** În raport cu o expresie dată!

Apariții ale variabilelor

 λ 

Mod de gândire

· O apariție **legată în expresie** este o apariție a parametrului formal al unei funcții definite **în expresie**, în corpul funcției; o apariție **liberă** este o apariție a parametrului formal al unei funcții definite **în exteriorul** expresiei, sau nu este parametru formal al niciunei funcții.

- $x_{<1>}$ ← apariție liberă



· O apariție **legată în expresie** este o apariție a parametrului formal al unei funcții definite **în expresie**, în corpul funcției; o apariție **liberă** este o apariție a parametrului formal al unei funcții definite **în exteriorul** expresiei, sau nu este parametru formal al niciunei funcții.

- $x_{\langle 1 \rangle}$ ← apariție liberă

- $(\lambda y. x_{\langle 1 \rangle} z)$ ← apariție încă liberă, nu o leagă nimeni



· O apariție **legată în expresie** este o apariție a parametrului formal al unei funcții definite **în expresie**, în corpul funcției; o apariție **liberă** este o apariție a parametrului formal al unei funcții definite **în exteriorul** expresiei, sau nu este parametru formal al niciunei funcții.

• $x_{\langle 1 \rangle}$ ← apariție liberă

• $(\lambda y. x_{\langle 1 \rangle} z)$ ← apariție încă liberă, nu o leagă nimeni

• $\lambda x_{\langle 2 \rangle}. (\lambda y. x_{\langle 1 \rangle} z)$ ← $\lambda x_{\langle 2 \rangle}$ leagă apariția $x_{\langle 1 \rangle}$



• O apariție **legată în expresie** este o apariție a parametrului formal al unei funcții definite **în** expresie, în corpul funcției; o apariție **liberă** este o apariție a parametrului formal al unei funcții definite **în exteriorul** expresiei, sau nu este parametru formal al niciunei funcții.

• $x_{\langle 1 \rangle}$ ← apariție liberă

• $(\lambda y. x_{\langle 1 \rangle} z)$ ← apariție încă liberă, nu o leagă nimeni

• $\lambda x_{\langle 2 \rangle}. (\lambda y. x_{\langle 1 \rangle} z)$ ← $\lambda x_{\langle 2 \rangle}$ leagă apariția $x_{\langle 1 \rangle}$

• $(\lambda x_{\langle 2 \rangle}. (\underbrace{\lambda y. x_{\langle 1 \rangle} z}_{\text{corp } \lambda x_2}) x_{\langle 3 \rangle})$ ← apariția x_3 este liberă – este în exteriorul corpului funcției cu parametrul formal x (λx_2)

Apariții ale variabilelor

 λ 

Mod de gândire

• O apariție **legată în expresie** este o apariție a parametrului formal al unei funcții definite **în** expresie, în corpul funcției; o apariție **liberă** este o apariție a parametrului formal al unei funcții definite **în exteriorul** expresiei, sau nu este parametru formal al niciunei funcții.

• $x_{\langle 1 \rangle}$ ← apariție liberă

• $(\lambda y. x_{\langle 1 \rangle} z)$ ← apariție încă liberă, nu o leagă nimeni

• $\lambda x_{\langle 2 \rangle}. (\lambda y. x_{\langle 1 \rangle} z)$ ← $\lambda x_{\langle 2 \rangle}$ leagă apariția $x_{\langle 1 \rangle}$

• $(\lambda x_{\langle 2 \rangle}. (\underbrace{(\lambda y. x_{\langle 1 \rangle} z)}_{\text{corp } \lambda x_2}) x_{\langle 3 \rangle})$ ← apariția x_3 este liberă – este în exteriorul corpului funcției cu parametrul formal x (λx_2)

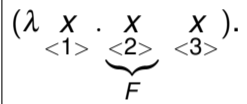
• $\lambda x_{\langle 4 \rangle}. (\lambda x_{\langle 2 \rangle}. (\lambda y. x_{\langle 1 \rangle} z) x_{\langle 3 \rangle})$ ← $\lambda x_{\langle 4 \rangle}$ leagă apariția $x_{\langle 3 \rangle}$

+ **O variabilă este legată** într-o expresie dacă **toate** aparițiile sale sunt legate în acea expresie.

+ **O variabilă este liberă** într-o expresie dacă nu este legată în acea expresie i.e. dacă **cel puțin o** apariție a sa este liberă în acea expresie.

- **Atenție!** În raport cu o **expresie** dată!

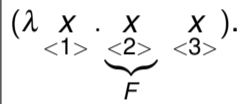
În expresia $E = (\lambda x.x x)$, evidențiem aparițiile lui x :



Exemplu

- $\underset{\langle 1 \rangle}{x}, \underset{\langle 2 \rangle}{x}$ în E
- $\underset{\langle 3 \rangle}{x}$ în E
- $\underset{\langle 2 \rangle}{x}$ în $F!$
- x în E și F

În expresia $E = (\lambda x.x x)$, evidențiem aparițiile lui x :



Exemplu

- $x_{\langle 1 \rangle}, x_{\langle 2 \rangle}$ legate în E
- $x_{\langle 3 \rangle}$ în E
- $x_{\langle 2 \rangle}$ în $F!$
- x în E și F

În expresia $E = (\lambda x.x x)$, evidențiem aparițiile lui x :

$(\lambda \underset{\langle 1 \rangle}{x} . \underbrace{\underset{\langle 2 \rangle}{x} \underset{\langle 3 \rangle}{x}}_F)$.

- $\underset{\langle 1 \rangle}{x}$, $\underset{\langle 2 \rangle}{x}$ **legate** în E
- $\underset{\langle 3 \rangle}{x}$ **liberă** în E
- $\underset{\langle 2 \rangle}{x}$ în F !
- x în E și F



Exemplu

În expresia $E = (\lambda x.x x)$, evidențiem aparițiile lui x :

$(\lambda \underset{\langle 1 \rangle}{x} . \underbrace{\underset{\langle 2 \rangle}{x} \underset{\langle 3 \rangle}{x}}_F)$.

- $\underset{\langle 1 \rangle}{x}$, $\underset{\langle 2 \rangle}{x}$ **legate** în E
- $\underset{\langle 3 \rangle}{x}$ **liberă** în E
- $\underset{\langle 2 \rangle}{x}$ **liberă** în F !
- x în E și F



Exemplu

În expresia $E = (\lambda x.x x)$, evidențiem aparițiile lui x :

$(\lambda \underset{\langle 1 \rangle}{x} . \underbrace{\underset{\langle 2 \rangle}{x} \underset{\langle 3 \rangle}{x}}_F)$.

- $\underset{\langle 1 \rangle}{x}$, $\underset{\langle 2 \rangle}{x}$ **legate** în E
- $\underset{\langle 3 \rangle}{x}$ **liberă** în E
- $\underset{\langle 2 \rangle}{x}$ **liberă** în F !
- x **liberă** în E și F



Exemplu

În expresia $E = (\lambda x. \lambda z. (z x) (z y))$, evidențiem aparițiile:

$(\lambda_{\langle 1 \rangle} x \cdot \lambda_{\langle 1 \rangle} z \cdot (\underbrace{z_{\langle 2 \rangle} x_{\langle 2 \rangle}}_F) (z_{\langle 3 \rangle} y_{\langle 1 \rangle})).$

- $x_{\langle 1 \rangle}, x_{\langle 2 \rangle}, z_{\langle 1 \rangle}, z_{\langle 2 \rangle}$ în E
- $y_{\langle 1 \rangle}, z_{\langle 3 \rangle}$ în E
- $z_{\langle 1 \rangle}, z_{\langle 2 \rangle}$ în F
- $x_{\langle 2 \rangle}$ în F
- x în $E,$ în F
- y în E
- z în $E,$ în F



Exemplu 2

În expresia $E = (\lambda x. \lambda z. (z x) (z y))$, evidențiem aparițiile:

- x , x , z , z **legate** în E
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$ $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$
- y , z în E
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 3 \rangle$
- z , z în F
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$
- x în F
 $\langle 2 \rangle$
- x în E , în F
- y în E
- z în E , în F

$$(\lambda_{\langle 1 \rangle} x . \lambda_{\langle 1 \rangle} z . \underbrace{(\lambda_{\langle 2 \rangle} z . \lambda_{\langle 2 \rangle} x)}_F) (\lambda_{\langle 3 \rangle} z . \lambda_{\langle 1 \rangle} y).$$



Exemplu

În expresia $E = (\lambda x. \lambda z. (z x) (z y))$, evidențiem aparițiile:

- $x_{\langle 1 \rangle}$, $x_{\langle 2 \rangle}$, $z_{\langle 1 \rangle}$, $z_{\langle 2 \rangle}$ **legate** în E
- $y_{\langle 1 \rangle}$, $z_{\langle 3 \rangle}$ **libere** în E
- $z_{\langle 1 \rangle}$, $z_{\langle 2 \rangle}$ în F
- $x_{\langle 2 \rangle}$ în F
- x în E , în F
- y în E
- z în E , în F

$$(\lambda_{\langle 1 \rangle} x_{\langle 1 \rangle} . \lambda_{\langle 1 \rangle} z_{\langle 1 \rangle} . (\underbrace{z_{\langle 2 \rangle} x_{\langle 2 \rangle}}_F) (z_{\langle 3 \rangle} y_{\langle 1 \rangle})).$$



Variabile și apariții ale lor

 λ

Exemplu 2

În expresia $E = (\lambda x. \lambda z. (z x) (z y))$, evidențiem aparițiile:

- x , x , z , z **legate** în E
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$ $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$
- y , z **libere** în E
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 3 \rangle$
- z , z **legate** în F
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$
- x în F
 $\langle 2 \rangle$
- x în E , în F
- y în E
- z în E , în F

$$(\lambda_{\langle 1 \rangle} x \cdot \lambda_{\langle 1 \rangle} z \cdot \underbrace{(\lambda_{\langle 2 \rangle} z \lambda_{\langle 2 \rangle} x)}_F) (\lambda_{\langle 3 \rangle} z \lambda_{\langle 1 \rangle} y).$$



Exemplu

Variabile și apariții ale lor

 λ

Exemplu 2

În expresia $E = (\lambda x. \lambda z. (z x) (z y))$, evidențiem aparițiile:

- x , x , z , z **legate** în E
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$ $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$
- y , z **libere** în E
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 3 \rangle$
- z , z **legate** în F
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$
- x **liberă** în F
 $\langle 2 \rangle$
- x în E , în F
- y în E
- z în E , în F

$$(\lambda_{\langle 1 \rangle} x \cdot \lambda_{\langle 1 \rangle} z \cdot (\underbrace{z_{\langle 2 \rangle} x_{\langle 2 \rangle}}_F) (z_{\langle 3 \rangle} y_{\langle 1 \rangle})).$$



Exemplu

În expresia $E = (\lambda x. \lambda z. (z x) (z y))$, evidențiem aparițiile:

- x , x , z , z **legate** în E
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$ $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$
- y , z **libere** în E
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 3 \rangle$
- z , z **legate** în F
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$
- x **liberă** în F
 $\langle 2 \rangle$
- x **legată** în E , dar **liberă** în F
- y în E
- z în E , în F

$$(\lambda_{\langle 1 \rangle} x \cdot \lambda_{\langle 1 \rangle} z \cdot (\underbrace{z_{\langle 2 \rangle} x_{\langle 2 \rangle}}_F) (z_{\langle 3 \rangle} y_{\langle 1 \rangle})).$$



În expresia $E = (\lambda x. \lambda z. (z x) (z y))$, evidențiem aparițiile:

- x , x , z , z **legate** în E
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$ $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$
- y , z **libere** în E
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 3 \rangle$
- z , z **legate** în F
 $\langle 1 \rangle$ $\langle 2 \rangle$
- x **liberă** în F
 $\langle 2 \rangle$
- x **legată** în E , dar **liberă** în F
- y **liberă** în E
- z în E , în F

$$(\lambda_{\langle 1 \rangle} x \cdot \lambda_{\langle 1 \rangle} z \cdot (\underbrace{z_{\langle 2 \rangle} x_{\langle 2 \rangle}}_F) (z_{\langle 3 \rangle} y_{\langle 1 \rangle})).$$



În expresia $E = (\lambda x. \lambda z. (z x) (z y))$, evidențiem aparițiile:

- $x_{\langle 1 \rangle}$, $x_{\langle 2 \rangle}$, $z_{\langle 1 \rangle}$, $z_{\langle 2 \rangle}$ **legate** în E
- $y_{\langle 1 \rangle}$, $z_{\langle 3 \rangle}$ **libere** în E
- $z_{\langle 1 \rangle}$, $z_{\langle 2 \rangle}$ **legate** în F
- $x_{\langle 2 \rangle}$ **liberă** în F
- x **legată** în E , dar **liberă** în F
- y **liberă** în E
- z **liberă** în E , dar **legată** în F

$$(\lambda_{\langle 1 \rangle} x_{\langle 1 \rangle} . \lambda_{\langle 1 \rangle} z_{\langle 1 \rangle} . (\underbrace{z_{\langle 2 \rangle} x_{\langle 2 \rangle}}_F) (z_{\langle 3 \rangle} y_{\langle 1 \rangle})).$$



Variabile libere (*free variables*)

- $FV(x) = \{x\}$
- $FV(\lambda x.E) = FV(E) \setminus \{x\}$
- $FV((E_1 E_2)) = FV(E_1) \cup FV(E_2)$

Variabile legate (*bound variables*)

- $BV(x) = \emptyset$
- $BV(\lambda x.E) = BV(E) \cup \{x\}$
- $BV((E_1 E_2)) = BV(E_1) \setminus FV(E_2) \cup BV(E_2) \setminus FV(E_1)$

+ **O expresie închisă** este o expresie care **nu** conține variabile libere.

Ex) Exemplu

- $(\lambda x.x \ \lambda x.\lambda y.x) \dots$
- $(\lambda x.x \ a) \dots$
- Variabilele **libere** dintr-o λ -expresie pot sta pentru alte λ -expresii
- Înaintea evaluării, o expresie trebuie adusă la forma **închisă**.
- Procesul de înlocuire trebuie să se **termine**.

+ **O expresie închisă** este o expresie care **nu** conține variabile libere.

Ex) Exemplu

- $(\lambda x.x \ \lambda x.\lambda y.x)$ → închisă
- $(\lambda x.x \ a)$...
- Variabilele **libere** dintr-o λ -expresie pot sta pentru alte λ -expresii
- Înaintea evaluării, o expresie trebuie adusă la forma **închisă**.
- Procesul de înlocuire trebuie să se **termine**.

+ **O expresie închisă** este o expresie care **nu** conține variabile libere.

Ex) Exemplu

- $(\lambda x.x \ \lambda x.\lambda y.x)$ → închisă
- $(\lambda x.x \ a)$ → deschisă, deoarece a este liberă
- Variabilele **libere** dintr-o λ -expresie pot sta pentru alte λ -expresii
- Înaintea evaluării, o expresie trebuie adusă la forma **închisă**.
- Procesul de înlocuire trebuie să se **termine**.

+ **β -reducere:** Evaluarea expresiei $(\lambda x.E A)$, cu E și A λ -expresii, prin **substituirea textuală** a tuturor aparițiilor **libere** ale parametrului **formal** al funcției, x , din corpul acesteia, E , cu parametrul **actual**, A :

$$(\lambda x.E A) \rightarrow_{\beta} E_{[A/x]}$$

+ **β -redex** Expresia $(\lambda x.E A)$, cu E și A λ -expresii – o expresie pe care se poate aplica β -reducerea.



- $(\lambda x.x y) \rightarrow_{\beta} x_{[y/x]} \rightarrow y$
- $(\lambda x.\lambda x.x y)$
- $(\lambda x.\lambda y.x y)$



- $(\lambda x.x y) \rightarrow_{\beta} x_{[y/x]} \rightarrow y$
- $(\lambda x.\lambda x.x y) \rightarrow_{\beta} \lambda x.x_{[y/x]} \rightarrow \lambda x.x$
- $(\lambda x.\lambda y.x y)$



- $(\lambda x.x y) \rightarrow_{\beta} x_{[y/x]} \rightarrow y$
- $(\lambda x.\lambda x.x y) \rightarrow_{\beta} \lambda x.x_{[y/x]} \rightarrow \lambda x.x$
- $(\lambda x.\lambda y.x y) \rightarrow_{\beta} \lambda y.x_{[y/x]} \rightarrow \lambda y.y$



Exemplu

- $(\lambda x.x y) \rightarrow_{\beta} x_{[y/x]} \rightarrow y$
- $(\lambda x.\lambda x.x y) \rightarrow_{\beta} \lambda x.x_{[y/x]} \rightarrow \lambda x.x$
- $(\lambda x.\lambda y.x y) \rightarrow_{\beta} \lambda y.x_{[y/x]} \rightarrow \lambda y.y$ **Greșit!** Variabila liberă y devine **legată**, schimbându-și semnificația. $\rightarrow \lambda y^{(a)}.y^{(b)}$



- $(\lambda x.x y) \rightarrow_{\beta} x_{[y/x]} \rightarrow y$
- $(\lambda x.\lambda x.x y) \rightarrow_{\beta} \lambda x.x_{[y/x]} \rightarrow \lambda x.x$
- $(\lambda x.\lambda y.x y) \rightarrow_{\beta} \lambda y.x_{[y/x]} \rightarrow \lambda y.y$ **Greșit!** Variabila liberă y devine **legată**, schimbându-și semnificația. $\rightarrow \lambda y^{(a)}.y^{(b)}$

Care este problema?

- **Problemă:** în expresia $(\lambda x.E A)$:
 - dacă variabilele libere din A nu au nume comune cu variabilele legate din E :
 $FV(A) \cap BV(E) = \emptyset$
→ reducere întotdeauna **corectă**
 - dacă există variabilele libere din A care au nume comune cu variabilele legate din E : $FV(A) \cap BV(E) \neq \emptyset$
→ reducere **potențial greșită**
- **Soluție:** redenumirea variabilelor legate din E , ce coincid cu cele libere din A → **α -conversie**.

- **Problemă:** în expresia $(\lambda x.E A)$:
 - dacă variabilele libere din A nu au nume comune cu variabilele legate din E :
 $FV(A) \cap BV(E) = \emptyset$
→ reducere întotdeauna **corectă**
 - dacă există variabilele libere din A care au nume comune cu variabilele legate din E : $FV(A) \cap BV(E) \neq \emptyset$
→ reducere **potențial greșită**
- **Soluție:** redenumirea variabilelor legate din E , ce coincid cu cele libere din A → **α -conversie**.

Ex Exemplu

$$(\lambda x.\lambda y.x y) \rightarrow_{\alpha} (\lambda x.\lambda z.x y) \rightarrow_{\beta} \lambda z.x_{[y/x]} \rightarrow \lambda z.y$$

+ **α -conversie:** Redenumirea sistematică a variabilelor **legate** dintr-o funcție: $\lambda x.E \rightarrow_{\alpha} \lambda y.E_{[y/x]}$. Se impun două condiții.



Exemplu

- $\lambda x.y \rightarrow_{\alpha} \lambda y.y_{[y/x]} \rightarrow \lambda y.y$
- $\lambda x.\lambda y.x \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda y.x_{[y/x]} \rightarrow \lambda y.\lambda y.y$

+ **α -conversie:** Redenumirea sistematică a variabilelor **legate** dintr-o funcție: $\lambda x.E \rightarrow_{\alpha} \lambda y.E_{[y/x]}$. Se impun două condiții.



Exemplu

- $\lambda x.y \rightarrow_{\alpha} \lambda y.y_{[y/x]} \rightarrow \lambda y.y \rightarrow$ **Greșit!**
- $\lambda x.\lambda y.x \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda y.x_{[y/x]} \rightarrow \lambda y.\lambda y.y$

+ **α -conversie:** Redenumirea sistematică a variabilelor **legate** dintr-o funcție: $\lambda x.E \rightarrow_{\alpha} \lambda y.E_{[y/x]}$. Se impun două condiții.



Exemplu

- $\lambda x.y \rightarrow_{\alpha} \lambda y.y_{[y/x]} \rightarrow \lambda y.y \rightarrow$ **Greșit!**
- $\lambda x.\lambda y.x \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda y.x_{[y/x]} \rightarrow \lambda y.\lambda y.y \rightarrow$ **Greșit!**

+ **α -conversie:** Redenumirea sistematică a variabilelor **legate** dintr-o funcție: $\lambda x.E \rightarrow_{\alpha} \lambda y.E_{[y/x]}$. Se impun două condiții.



Exemplu

- $\lambda x.y \rightarrow_{\alpha} \lambda y.y_{[y/x]} \rightarrow \lambda y.y \rightarrow$ **Greșit!**
- $\lambda x.\lambda y.x \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda y.x_{[y/x]} \rightarrow \lambda y.\lambda y.y \rightarrow$ **Greșit!**

∴ Condiții

- y **nu** este o variabilă liberă, existentă deja în E
- orice apariție liberă în E **rămâne** liberă în $E_{[y/x]}$

Exemple

• $\lambda x.(x y) \rightarrow_{\alpha} \lambda z.(z y) \rightarrow$ Corect!

• $\lambda x.\lambda x.(x y) \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda x.(x y)$

• $\lambda x.\lambda y.(y x) \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda y.(y y)$

• $\lambda x.\lambda y.(y y) \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda y.(y y)$



Exemplu

Exemple



Exemplu

- $\lambda x.(x y) \rightarrow_{\alpha} \lambda z.(z y) \rightarrow$ Corect!
- $\lambda x.\lambda x.(x y) \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda x.(x y) \rightarrow$ **Greșit!** y este liberă în $\lambda x.(x y)$
- $\lambda x.\lambda y.(y x) \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda y.(y y)$
- $\lambda x.\lambda y.(y y) \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda y.(y y)$



- $\lambda x.(x y) \rightarrow_{\alpha} \lambda z.(z y) \rightarrow$ Corect!
- $\lambda x.\lambda x.(x y) \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda x.(x y) \rightarrow$ **Greșit!** y este liberă în $\lambda x.(x y)$
- $\lambda x.\lambda y.(y x) \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda y.(y y) \rightarrow$ **Greșit!** Apariția liberă a lui x din $\lambda y.(y x)$ devine legată, după substituire, în $\lambda y.(y y)$
- $\lambda x.\lambda y.(y y) \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda y.(y y)$



- $\lambda x.(x y) \rightarrow_{\alpha} \lambda z.(z y) \rightarrow$ Corect!
- $\lambda x.\lambda x.(x y) \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda x.(x y) \rightarrow$ **Greșit!** y este liberă în $\lambda x.(x y)$
- $\lambda x.\lambda y.(y x) \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda y.(y y) \rightarrow$ **Greșit!** Apariția liberă a lui x din $\lambda y.(y x)$ devine legată, după substituire, în $\lambda y.(y y)$
- $\lambda x.\lambda y.(y y) \rightarrow_{\alpha} \lambda y.\lambda y.(y y) \rightarrow$ Corect!

+ **Pas de reducere:** O secvență formată dintr-o α -conversie și o β -reducere, astfel încât a doua se produce **fără coliziuni**:

$$E_1 \rightarrow E_2 \equiv E_1 \rightarrow_{\alpha} E_3 \rightarrow_{\beta} E_2.$$

+ **Secvență de reducere:** Succesiune de zero sau mai mulți pași de reducere:

$$E_1 \rightarrow^* E_2.$$

Reprezintă un element din închiderea reflexiv-tranzitivă a relației \rightarrow .

⋮ Reducere

- $E_1 \rightarrow E_2 \implies E_1 \rightarrow^* E_2$ – un pas este o secvență
- $E \rightarrow^* E$ – zero pași formează o secvență
- $E_1 \rightarrow^* E_2 \wedge E_2 \rightarrow^* E_3 \implies E_1 \rightarrow^* E_3$ – tranzitivitate



Exemplu

$$\begin{aligned} & ((\lambda x. \lambda y. (y \ x)) \ y) \ \lambda x. x \rightarrow (\lambda z. (z \ y) \ \lambda x. x) \rightarrow (\lambda x. x \ y) \rightarrow y \\ & \implies \\ & ((\lambda x. \lambda y. (y \ x)) \ y) \ \lambda x. x \rightarrow^* y \end{aligned}$$

Evaluare

· Dacă am vrea să construim o mașină de calcul care să aibă ca program o λ -expresie și să aibă ca operație de bază pasul de reducere, ne punem câteva întrebări:

- 1 Când se **termină** calculul? Se termină **întotdeauna**?
- 2 Dacă mai multe secvențe de reducere se termină, obținem **întotdeauna același** rezultat?
- 3 Comportamentul **depinde** de secvența de reducere?
- 4 Dacă rezultatul este unic, **cum** îl obținem?

Terminarea reducerii (reductibilitate)

 λ

Exemplu și definiție



Exemplu

$$\Omega = (\lambda x.(x x) \lambda x.(x x)) \rightarrow (\lambda x.(x x) \lambda x.(x x)) \rightarrow^* \dots$$



$\Omega = (\lambda x.(x x) \lambda x.(x x)) \rightarrow (\lambda x.(x x) \lambda x.(x x)) \rightarrow^* \dots$

Ω **nu** admite nicio secvență de reducere care se termină.

+ **Expresie reductibilă** este o expresie care admite (cel puțin o) secvență de reducere care se termină.

· expresia Ω **nu** este reductibilă.

Secvențe de reducere și terminare

 λ

Dar!

$$E = (\lambda x.y \ \Omega)$$

$$\rightarrow y \quad \text{sau}$$

$$\rightarrow E \rightarrow y \quad \text{sau}$$

$$\rightarrow E \rightarrow E \rightarrow y \quad \text{sau...}$$

 \vdots

$$\xrightarrow{n^*} y, n \geq 0$$

$$\xrightarrow{\infty^*} \dots$$



Exemplu

Dar!

$$E = (\lambda x.y \ \Omega)$$

$$\rightarrow y \quad \text{sau}$$

$$\rightarrow E \rightarrow y \quad \text{sau}$$

$$\rightarrow E \rightarrow E \rightarrow y \quad \text{sau...}$$

$$\vdots$$
$$\xrightarrow{n^*} y, n \geq 0$$

$$\xrightarrow{\infty^*} \dots$$

- E are o secvență de reducere care **nu** se termină;
- dar E are **forma normală** $y \Rightarrow E$ este reductibilă;
- lungimea secvențelor de reducere ale E este **nemărginită**.

Ex

Exemplu

Forme normale

 λ

Cum știm că s-a terminat calculul?

· Calculul **se termină** atunci când expresia nu mai poate fi redusă → expresia nu mai conține β -redecși.

+ **Forma normală** a unei expresii este o formă (la care se ajunge prin **reducere**, care **nu** mai conține β -redecși i.e. care **nu** mai poate fi redusă.

Este necesar să mergem până la Forma Normală?

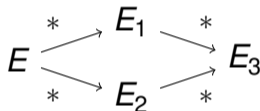
+ **Forma normală funcțională – FNF** este o formă $\lambda x.F$, în care F poate **conține** β -redecși.

Ex) Exemplu

$$(\lambda x.\lambda y.(x\ y)\ \lambda x.x) \rightarrow_{FNF} \lambda y.(\lambda x.x\ y) \rightarrow_{FN} \lambda y.y$$

- FN a unei expresii închise este în mod necesar FNF.
- într-o FNF nu există o necesitate imediată de a **evalua** eventualii β -redecși interiori (funcția nu a fost încă aplicată).

T | Teorema Church-Rosser / diamantului Dacă $E \rightarrow^* E_1$ și $E \rightarrow^* E_2$, atunci **există** E_3 astfel încât $E_1 \rightarrow^* E_3$ și $E_2 \rightarrow^* E_3$.



C | Corolar Dacă o expresie este reductibilă, forma ei normală este **unică**. Ea corespunde **valorii** expresiei.

Unicitatea formei normale

Exemplu

 λ 

Exemplu

 $(\lambda x. \lambda y. (x y) (\lambda x. x y))$



$(\lambda x. \lambda y. (x y) (\lambda x. x y))$

- $\rightarrow \lambda z. ((\lambda x. x y) z) \rightarrow \lambda z. (y z) \rightarrow_{\alpha} \lambda a. (y a)$
- $\rightarrow (\lambda x. \lambda y. (x y) y) \rightarrow \lambda w. (y w) \rightarrow_{\alpha} \lambda a. (y a)$



$(\lambda x. \lambda y. (x\ y) (\lambda x. x\ y))$

- $\rightarrow \lambda z. ((\lambda x. x\ y)\ z) \rightarrow \lambda z. (y\ z) \rightarrow_{\alpha} \lambda a. (y\ a)$
- $\rightarrow (\lambda x. \lambda y. (x\ y)\ y) \rightarrow \lambda w. (y\ w) \rightarrow_{\alpha} \lambda a. (y\ a)$

- Forma normală corespunde unei **clase** de expresii, echivalente sub **redenumiri** sistematice.
 - **Valoarea** este un anumit membru al acestei clase de echivalență.
- \Rightarrow Valorile sunt **echivalente** în raport cu **redenumirea**.

Modalități de reducere

Cum putem organiza reducerea?

 λ

+ **Reducere stânga-dreapta:** Reducerea celui mai **superficial** și mai din **stânga** β -redex.

Ex Exemplu

$((\lambda x.x \lambda x.y) (\lambda x.(x x) \lambda x.(x x))) \rightarrow (\lambda x.y \ \Omega) \rightarrow y$

+ **Reducere dreapta-stânga:** Reducerea celui mai **adânc** și mai din **dreapta** β -redex.

Ex Exemplu

$(\lambda x.(\lambda x.x \lambda x.y) (\lambda x.(x x) \lambda x.(x x))) \rightarrow (\lambda x.(\lambda x.x \lambda x.y) \ \Omega) \rightarrow \dots$

T **Teorema normalizării** Dacă o expresie este reductibilă, evaluarea **stânga-dreapta** a acesteia se termină.

- Teorema normalizării (normalizare = aducere la forma normală) **nu** garantează terminarea evaluării oricărei expresii, ci doar a celor **reductibile!**
- Dacă expresia este ireductibilă, **nicio** reducere nu se va termina.

- 1 Când se **termină** calculul? Se termină **întotdeauna**?
→ se termină cu **forma normală [funcțională]**. **NU** se termină decât dacă expresia este **reductibilă**.
- 2 Comportamentul **depinde** de secvența de reducere?
→ **DA**.
- 3 Dacă mai multe secvențe de reducere se termină, obținem întotdeauna **același** rezultat?
→ **DA**.
- 4 Dacă rezultatul este unic, **cum** îl obținem?
→ Reducere **stânga-dreapta**.
- 5 Care este valoarea expresiei?
→ Forma normală [funcțională] (**FN[F]**).

- **+** **Evaluare aplicativă** (*eager*) – corespunde unei reduceri *mai degrabă dreapta-stânga*. Parametrii funcțiilor sunt evaluați *înaintea* aplicării funcției.
- **+** **Evaluare normală** (*lazy*) – corespunde reducerii *stânga-dreapta*. Parametrii funcțiilor sunt evaluați *la cerere*.
- **+** **Funcție strictă** – funcție cu evaluare *aplicativă*.
- **+** **Funcție nestrictă** – funcție cu evaluare *normală*.

- Evaluarea **aplicativă** prezentă în majoritatea limbajelor: C, Java, Scheme, PHP etc.

Ex Exemplu

$(+ (+ 2 3) (* 2 3)) \rightarrow (+ 5 6) \rightarrow 11$

- Nevoie de funcții **nestricte**, chiar în limbajele aplicative: `if`, `and`, `or` etc.

Ex Exemplu

$(\text{if } (< 2 3) (+ 2 3) (* 2 3)) \rightarrow (< 2 3) \rightarrow \#t \rightarrow (+ 2 3) \rightarrow 5$

Limbajul lambda-0 și incursiune în TDA

- Am putea crea o mașină de calcul folosind calculul λ – mașină de calcul **ipotecă**;
- Mașina folosește limbajul $\lambda_0 \equiv$ calcul lambda;
- **Programul** \rightarrow λ -expresie;
 - + Legări top-level de expresii la nume.
- **Datele** \rightarrow λ -expresii;
- Funcționarea mașinii \rightarrow **reducere** – substituție textuală
 - evaluare normală;
 - terminarea evaluării cu forma normală funcțională;
 - se folosesc numai expresii închise.

Tipuri de date

Cum reprezentăm datele? Cum interpretăm valorile?

- Putem reprezenta toate datele prin funcții cărora, **convențional**, le dăm o semnificație **abstractă**.

Ex | Exemplu

$$T \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. x \qquad F \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. y$$

- Pentru aceste **tipuri de date abstracte (TDA)** creăm operatori care transformă datele în mod coerent cu interpretarea pe care o dăm valorilor.

Ex | Exemplu

$$\begin{aligned} not &\equiv_{\text{def}} \lambda x. ((x \ F) \ T) \\ (not \ T) &\rightarrow (\lambda x. ((x \ F) \ T) \ T) \rightarrow ((T \ F) \ T) \rightarrow F \end{aligned}$$

+ **Tip de date abstract – TDA** – Model matematic al unei mulțimi de valori și al operațiilor valide pe acestea.

⋮ Componente

- **constructori de bază**: cum se generează valorile;
- **operatori**: ce se poate face cu acestea;
- **axiome**: cum lucrează operatorii / ce restricții există.

TDA *Bool*

Specificare

λ

· Constructori: $\left\{ \begin{array}{l} T : \rightarrow Bool \\ F : \rightarrow Bool \end{array} \right.$

TDA *Bool*

Specificare

 λ

· Constructori: $\left\{ \begin{array}{l} T : \rightarrow Bool \\ F : \rightarrow Bool \end{array} \right.$

· Operatori: $\left\{ \begin{array}{l} not : Bool \rightarrow Bool \\ and : Bool^2 \rightarrow Bool \\ or : Bool^2 \rightarrow Bool \\ if : Bool \times A \times A \rightarrow A \end{array} \right.$

· Constructori: $\left\{ \begin{array}{l} T : \rightarrow Bool \\ F : \rightarrow Bool \end{array} \right.$

· Operatori: $\left\{ \begin{array}{l} not : Bool \rightarrow Bool \\ and : Bool^2 \rightarrow Bool \\ or : Bool^2 \rightarrow Bool \\ if : Bool \times A \times A \rightarrow A \end{array} \right.$

· Axiome: $\left\{ \begin{array}{ll} not : not(T) = F & not(F) = T \\ and : and(T, a) = a & and(F, a) = F \\ or : or(T, a) = T & or(F, a) = a \\ if : if(T, a, b) = a & if(F, a, b) = b \end{array} \right.$



Intuiție bazat pe comportamentul necesar pentru if: **selecția** între cele două valori

- $T \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. x$
- $F \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. y$

- $if \equiv_{\text{def}} \lambda c.\lambda x.\lambda y.((c\ x)\ y)$

- $if \equiv_{\text{def}} \lambda c.\lambda x.\lambda y.((c\ x)\ y)$
- $and \equiv_{\text{def}} \lambda x.\lambda y.((x\ y)\ F)$

- $if \equiv_{\text{def}} \lambda c. \lambda x. \lambda y. ((c\ x)\ y)$
- $and \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)$
 - $((and\ T)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)\ T)\ a) \rightarrow ((T\ a)\ F) \rightarrow a$

- $if \equiv_{\text{def}} \lambda c.\lambda x.\lambda y.((c\ x)\ y)$
- $and \equiv_{\text{def}} \lambda x.\lambda y.((x\ y)\ F)$
 - $((and\ T)\ a) \rightarrow ((\lambda x.\lambda y.((x\ y)\ F)\ T)\ a) \rightarrow ((T\ a)\ F) \rightarrow a$
 - $((and\ F)\ a) \rightarrow ((\lambda x.\lambda y.((x\ y)\ F)\ F)\ a) \rightarrow ((F\ a)\ F) \rightarrow F$

- $if \equiv_{\text{def}} \lambda c. \lambda x. \lambda y. ((c\ x)\ y)$
- $and \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)$
 - $((and\ T)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)\ T)\ a) \rightarrow ((T\ a)\ F) \rightarrow a$
 - $((and\ F)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)\ F)\ a) \rightarrow ((F\ a)\ F) \rightarrow F$
- $or \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)$

- $if \equiv_{\text{def}} \lambda c. \lambda x. \lambda y. ((c\ x)\ y)$
- $and \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)$
 - $((and\ T)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)\ T)\ a) \rightarrow ((T\ a)\ F) \rightarrow a$
 - $((and\ F)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)\ F)\ a) \rightarrow ((F\ a)\ F) \rightarrow F$
- $or \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)$
 - $((or\ T)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)\ T)\ a) \rightarrow ((T\ T)\ a) \rightarrow T$

- $if \equiv_{\text{def}} \lambda c. \lambda x. \lambda y. ((c\ x)\ y)$
- $and \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)$
 - $((and\ T)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)\ T)\ a) \rightarrow ((T\ a)\ F) \rightarrow a$
 - $((and\ F)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)\ F)\ a) \rightarrow ((F\ a)\ F) \rightarrow F$
- $or \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)$
 - $((or\ T)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)\ T)\ a) \rightarrow ((T\ T)\ a) \rightarrow T$
 - $((or\ F)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)\ F)\ a) \rightarrow ((F\ T)\ a) \rightarrow a$

- $if \equiv_{\text{def}} \lambda c. \lambda x. \lambda y. ((c\ x)\ y)$
- $and \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)$
 - $((and\ T)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)\ T)\ a) \rightarrow ((T\ a)\ F) \rightarrow a$
 - $((and\ F)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)\ F)\ a) \rightarrow ((F\ a)\ F) \rightarrow F$
- $or \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)$
 - $((or\ T)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)\ T)\ a) \rightarrow ((T\ T)\ a) \rightarrow T$
 - $((or\ F)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)\ F)\ a) \rightarrow ((F\ T)\ a) \rightarrow a$
- $not \equiv_{\text{def}} \lambda x. ((x\ F)\ T)$

- $if \equiv_{\text{def}} \lambda c. \lambda x. \lambda y. ((c\ x)\ y)$
- $and \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)$
 - $((and\ T)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)\ T)\ a) \rightarrow ((T\ a)\ F) \rightarrow a$
 - $((and\ F)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)\ F)\ a) \rightarrow ((F\ a)\ F) \rightarrow F$
- $or \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)$
 - $((or\ T)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)\ T)\ a) \rightarrow ((T\ T)\ a) \rightarrow T$
 - $((or\ F)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)\ F)\ a) \rightarrow ((F\ T)\ a) \rightarrow a$
- $not \equiv_{\text{def}} \lambda x. ((x\ F)\ T)$
 - $(not\ T) \rightarrow (\lambda x. ((x\ F)\ T)\ T) \rightarrow ((T\ F)\ T) \rightarrow F$

- $if \equiv_{\text{def}} \lambda c. \lambda x. \lambda y. ((c\ x)\ y)$
- $and \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)$
 - $((and\ T)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)\ T)\ a) \rightarrow ((T\ a)\ F) \rightarrow a$
 - $((and\ F)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ y)\ F)\ F)\ a) \rightarrow ((F\ a)\ F) \rightarrow F$
- $or \equiv_{\text{def}} \lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)$
 - $((or\ T)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)\ T)\ a) \rightarrow ((T\ T)\ a) \rightarrow T$
 - $((or\ F)\ a) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. ((x\ T)\ y)\ F)\ a) \rightarrow ((F\ T)\ a) \rightarrow a$
- $not \equiv_{\text{def}} \lambda x. ((x\ F)\ T)$
 - $(not\ T) \rightarrow (\lambda x. ((x\ F)\ T)\ T) \rightarrow ((T\ F)\ T) \rightarrow F$
 - $(not\ F) \rightarrow (\lambda x. ((x\ F)\ T)\ F) \rightarrow ((F\ F)\ T) \rightarrow T$

- Intuiție: pereche \rightarrow funcție ce așteaptă **selectorul**, pentru a-l aplica asupra membrilor

- Intuiție: pereche \rightarrow funcție ce așteaptă **selectorul**, pentru a-l aplica asupra membrilor
- $fst \equiv_{\text{def}} \lambda p.(p T)$

- Intuiție: pereche \rightarrow funcție ce așteaptă **selectorul**, pentru a-l aplica asupra membrilor
- $fst \equiv_{\text{def}} \lambda p.(p T)$
 - $(fst ((pair a) b)) \rightarrow (\lambda p.(p T) \lambda z.((z a) b)) \rightarrow (\lambda z.((z a) b) T) \rightarrow ((T a) b) \rightarrow a$

- Intuiție: pereche \rightarrow funcție ce așteaptă **selectorul**, pentru a-l aplica asupra membrilor
- $fst \equiv_{\text{def}} \lambda p.(p T)$
 - $(fst ((pair a) b)) \rightarrow (\lambda p.(p T) \lambda z.((z a) b)) \rightarrow (\lambda z.((z a) b) T) \rightarrow ((T a) b) \rightarrow a$
- $snd \equiv_{\text{def}} \lambda p.(p F)$

- Intuiție: pereche \rightarrow funcție ce așteaptă **selectorul**, pentru a-l aplica asupra membrilor
- $fst \equiv_{\text{def}} \lambda p.(p T)$
 - $(fst ((pair a) b)) \rightarrow (\lambda p.(p T) \lambda z.((z a) b)) \rightarrow (\lambda z.((z a) b) T) \rightarrow ((T a) b) \rightarrow a$
- $snd \equiv_{\text{def}} \lambda p.(p F)$
 - $(snd ((pair a) b)) \rightarrow (\lambda p.(p F) \lambda z.((z a) b)) \rightarrow (\lambda z.((z a) b) F) \rightarrow ((F a) b) \rightarrow b$

- Intuiție: pereche \rightarrow funcție ce așteaptă **selectorul**, pentru a-l aplica asupra membrilor
- $fst \equiv_{\text{def}} \lambda p.(p T)$
 - $(fst ((pair\ a)\ b)) \rightarrow (\lambda p.(p\ T)\ \lambda z.((z\ a)\ b)) \rightarrow (\lambda z.((z\ a)\ b)\ T) \rightarrow ((T\ a)\ b) \rightarrow a$
- $snd \equiv_{\text{def}} \lambda p.(p F)$
 - $(snd ((pair\ a)\ b)) \rightarrow (\lambda p.(p\ F)\ \lambda z.((z\ a)\ b)) \rightarrow (\lambda z.((z\ a)\ b)\ F) \rightarrow ((F\ a)\ b) \rightarrow b$
- $pair \equiv_{\text{def}} \lambda x.\lambda y.\lambda z.((z\ x)\ y)$

- Intuiție: pereche \rightarrow funcție ce așteaptă **selectorul**, pentru a-l aplica asupra membrilor
- $fst \equiv_{\text{def}} \lambda p.(p T)$
 - $(fst ((pair a) b)) \rightarrow (\lambda p.(p T) \lambda z.((z a) b)) \rightarrow (\lambda z.((z a) b) T) \rightarrow ((T a) b) \rightarrow a$
- $snd \equiv_{\text{def}} \lambda p.(p F)$
 - $(snd ((pair a) b)) \rightarrow (\lambda p.(p F) \lambda z.((z a) b)) \rightarrow (\lambda z.((z a) b) F) \rightarrow ((F a) b) \rightarrow b$
- $pair \equiv_{\text{def}} \lambda x.\lambda y.\lambda z.((z x) y)$
 - $((pair a) b) \rightarrow ((\lambda x.\lambda y.\lambda z.((z x) y) a) b) \rightarrow \lambda z.((z a) b)$



Intuiție: listă \rightarrow pereche (*head*, *tail*)

- $nil \equiv_{\text{def}} \lambda x. T$
- $cons \equiv_{\text{def}} pair$
 - $((cons\ e)\ L) \rightarrow ((\lambda x. \lambda y. \lambda z. ((z\ x)\ y)\ e)\ L) \rightarrow \lambda z. ((z\ e)\ L)$
- $car \equiv_{\text{def}} fst$ $cdr \equiv_{\text{def}} snd$



Intuiție: număr \rightarrow listă cu lungimea egală cu valoarea numărului

- $zero \equiv_{\text{def}} nil$
- $succ \equiv_{\text{def}} \lambda n. ((cons\ nil)\ n)$
- $pred \equiv_{\text{def}} cdr$

• vezi și [http://en.wikipedia.org/wiki/Lambda_calculus#Encoding_datatypes]

- Modalitate de exprimare a **intenției** programatorului;
- **Documentare**: ce operatori acționează asupra căror obiecte;
- Reprezentarea **particulară** a valorilor de tipuri diferite:
1, “Hello”, #t etc.;
- **Optimizarea** operațiilor specifice;
- Prevenirea **erorilor**;
- Facilitarea verificării **formale**;

Absența tipurilor

 λ

Consecințe asupra reprezentării obiectelor

- Un număr, o listă sau un arbore, posibil desemnate de **aceeași** valoare!
- Valori și operatori reprezentați de funcții, semnificația fiind dependentă de **context**.
- Valoare **aplicabilă** asupra unei alte valori \rightarrow operator!

- Incapacitatea Mașinii λ de a
 - interpreta **semnificația** expresiilor;
 - asigura **corectitudinea** acestora (dpdv al tipurilor).
- Delegarea celor două aspecte **programatorului**;
- **Orice** operatori aplicabili asupra **oricăror** valori;
- Construcții eronate **acceptate** fără avertisment, dar calcule terminate cu
 - valori **fără** semnificație *sau*
 - expresii care **nu** sunt valori (nu au asociată o semnificație), dar sunt **ireductibile**→ **instabilitate**.

- **Flexibilitate** sporită în reprezentare;
 - Potrivită în situațiile în care reprezentarea **uniformă** obiectelor, ca liste de simboluri, este convenabilă.
- ... vin cu prețul unei dificultăți sporite în **depanare**, **verificare** și **mentenanță**

- Cum realizăm recursivitatea în λ_0 , dacă nu avem nume de funcții?
 - **Textuală**: funcție care se autoapelează, folosindu-și **numele**;
 - **Semantică**: ce **obiect** matematic este desemnat de o funcție recursivă, cu posibilitatea construirii de funcții recursive **anonime**.

- Lungimea unei liste:

$\text{length} \equiv_{\text{def}} \lambda L. (\text{if } (\text{null? } L) \text{ zero } (\text{succ } (\text{length } (\text{cdr } L))))$

- Cu ce **înlocuim** zona subliniată, pentru a evita recursivitatea textuală? (expresia pentru *length* nu este închisă!)
- Putem primi ca **parametru** o funcție echivalentă computațional cu *length*?
 $\text{Length} \equiv_{\text{def}} \lambda f L. (\text{if } (\text{null? } L) \text{ zero } (\text{succ } (f (\text{cdr } L))))$
- $(\text{Length } \text{length}) = \text{length} \rightarrow \text{length}$ este un **punct fix** al lui *Length*!
- Cum **obținem** punctul fix?



$Fix = \lambda f.(\lambda x.(f (x x)) \lambda x.(f (x x)))$

- $(Fix F) \rightarrow (\lambda x.(F (x x)) \lambda x.(F (x x))) \rightarrow (F (\lambda x.(F (x x)) \lambda x.(F (x x)))) \rightarrow (F (Fix F))$
- $(Fix F)$ este un **punct fix** al lui F .
- Fix se numește **combinator de punct fix**.
- $length \equiv_{\text{def}} (Fix Length) \sim (Length (Fix Length)) \sim \lambda L.(if (null? L) zero (succ ((Fix Length) (cdr L))))$
- Funcție recursivă, **fără** a fi textual recursivă!

Racket vs. lambda-0

	λ	Racket
Variabilă/nume	x	<code>x</code>
Funcție	$\lambda x. corp$	<code>(lambda (x) corp)</code>
uncurry	$\lambda x y. corp$	<code>(lambda (x y) corp)</code>
Aplicare	$(F A)$	<code>(f a)</code>
uncurry	$(F A1 A2)$	<code>(f a1 a2)</code>
Legare top-level	-	<code>(define nume expr)</code>
Program	λ -expresie încisă	colecție de legări top-level (<code>define</code>)
Valori	λ -expresii / TDA	valori de diverse tipuri (numere, liste, etc.)

- similar cu λ_0 , folosește S-expresii (bază Lisp);
- **tipat** – dinamic/latent
 - variabilele **nu** au tip;
 - valorile **au** tip (3, #f);
 - verificarea se face la **execuție**, în momentul aplicării unei funcții;
- evaluare **aplicativă**;
- permite recursivitate **textuală**;
- avem legări top-level.

- Baza formală a calculului λ :
- expresie λ , β -redex, variabile și apariții legate vs. libere, expresie închisă, α -conversie, β -reducere
- FN și FNF, reducere, reductibilitate, evaluare aplicativă și normală
- TDA și recursivitate pentru calcul lambda
+ Dați feedback la acest curs aici:
[\[https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeY7VuAt5n6hyHHnNUplLWfWt7UkJBGhkviewform\]](https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeY7VuAt5n6hyHHnNUplLWfWt7UkJBGhkviewform)

